



Movilidad de sales por ascenso capilar a partir del acuífero freático en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca

Mobility of salts by capillarity rise from the phreatic aquifer in the southwest sector of the Bahía Blanca city

Lexow, Claudio ^{1,2} ✉ - Scherger, Leonardo ^{1,2} - Pera Vallejos, Guillermo ¹ - Bauer, Emiliano ¹

Recibido: 01 de agosto de 2018 • Aceptado: 22 de diciembre de 2018

Resumen

El sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por la presencia de suelos de textura fina y de un acuífero freático hipersalino somero, condiciones que determinan el predominio de movimientos hídricos verticales dentro de la zona no saturada (ZNS), propiciando la concentración de sales por evapotranspiración en los niveles superficiales del suelo. Estos procesos pueden relacionarse a problemáticas en pavimentos y estructuras de hormigón en la zona. Este trabajo tiene como objetivo determinar los principales mecanismos de movilidad y acumulación de sales en un terreno limo arcilloso mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D. El modelo de transporte propuesto basado en datos antecedentes, correspondientes al período 2011 - 2017, permite establecer condiciones similares a los valores actuales de campo. El movimiento de sales en el perfil de suelo se encuentra ligado a la hidrodinámica natural de la ZNS, donde los procesos de capilaridad y evapotranspiración son los principales agentes de acumulación de solutos. Las precipitaciones permiten el ingreso de agua de baja salinidad al perfil ocasionando la dilución de las concentraciones. La ocurrencia de períodos climáticos cálidos y secos son críticos para la acumulación de sales, generando un grave peligro para las estructuras en superficie, dada la alteración de las sales solubles sobre los agregados pétreos. En el futuro será necesario profundizar las simulaciones incorporando los procesos de precipitación, intercambio catiónico, dilución, etc., como las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.

Palabras Clave: Zona no saturada, salinidad, Hydrus, transporte de solutos, Bahía Blanca.

Abstract

The southwestern sector of the Bahía Blanca city is characterized by the presence of fine textured soils and a shallow hypersaline aquifer, conditions that determine the predominance of vertical water movements within the unsaturated zone, favoring the concentration of salts by evapotranspiration in the superficial levels of the soil. These processes can be related to problems in pavements and concrete structures in the zone. The objective of this work is to determine the main mobility and accumulation mechanisms

1. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA). Comisión de Investigaciones Científicas, San Juan 670 (8000,) Bahía Blanca

✉ lexow@uns.edu.ar

2. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), San Juan 670, B8000ICN, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

of salts in a clay loam soil by applying the HYDRUS 2D/3D code. The proposed transport model based on background data, corresponding to the 2011 - 2017 period, allows establishing similar conditions to the current field values. Movement of salts in the soil profile is linked to the natural hydrodynamics of the vadose zone, where the processes of capillarity and evapotranspiration are the main agents of solute accumulation. Precipitations allow the entrance of low salinity water into the soil profile causing the dilution of the concentrations. The occurrence of hot and dry climatic periods are critical for the salts accumulation, generating a serious danger for the surface structures, given the alteration of soluble salts on stone aggregates. In the future it will be necessary to deepen the simulations incorporating the processes of precipitation, cation exchange, dilution, etc., as the reactions in the soil-water-concrete interface.

Keywords: Vadose Zone, salinity, Hydrus, solute transport, Bahía Blanca.

INTRODUCCIÓN

El sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por la presencia de suelos de texturas finas y de un nivel freático somero, condiciones que determinan el predominio de movimientos verticales y la transferencia del agua por ascenso capilar a través de la zona no saturada (ZNS), propiciando la concentración de sales por evapotranspiración (Pérez Marfil et al., 2017). Tanto la evaporación como la transpiración remueven la humedad del suelo, generando un incremento de las concentraciones salinas en el agua edáfica remanente (Corwin et al., 2007). De este modo, la salinización del suelo se vería acelerada por la ocurrencia de altos gradientes mátricos, especialmente dada la existencia de acuíferos freáticos hipersalinos someros.

En diversos sectores de la localidad se han detectado problemas (grietas y fisuras) en los pavimentos y estructuras de hormigón que, relacionadas a las condiciones del subsuelo que conforma el área, podrían estar vinculadas a este proceso. El deterioro del hormigón en suelos salinos se debe tanto al ataque físico como al ataque químico de las sales que penetran en su estructura. Únicamente las sales solubles de la solución edáfica son capaces de movilizarse dentro de los poros del material, y si ocurre evaporación las sales pueden precipitar, resultando en deformidades estructurales (Graham, 2005). Las reacciones químicas se manifiestan a través de efectos físicos nocivos tales como el aumento de la porosidad y la permeabilidad, disminución en la resistencia, fisuración y delaminación (Oshiro et al., 2008). Irassar et al. (2010) demostraron que la cristalización de sales en el interior del cuerpo poroso del hormigón genera la microfisuración y el descascaramiento de la superficie. El proceso requiere la presencia de agua, que transporte la sal en solución a través de los poros interconectados, de evaporación que provoque la sobresaturación de la sal en los poros y la cristalización en estas condiciones. El acuífero freático costero de la ciudad de Bahía Blanca es catalogado como hipersalino, siendo el agua subterránea clasificada como clorurada sódica a clorurada sulfatada sódica (Bonorino y Sala, 1983). Las sales solubles se movilizan libremente en el perfil no saturado vinculadas mayormente a flujos hídricos verticales ascendentes, donde la posición del nivel freático ejerce un control efectivo en la hidrodinámica del sistema no saturado (Lexow et al., 2017; Scherger, 2017).

Los modelos de simulación han sido herramientas muy valiosas para estudios que involucran procesos complejos e interactivos en el flujo de agua y transportes de solutos dentro de la ZNS. El código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) es uno de los modelos más aceptados en la bibliografía en la

evaluación de parámetros hidráulicos del suelo, transporte de solutos, diagramas de riego y fertilización, calidad de agua edáfica y simulación de flujos hídricos, entre otros. (Arbat et al., 2003; Ajdary, 2008; Askry et al., 2014; Gardenas et al., 2005; Lexow, 2010, 2011; Phogat et al., 2013, 2014; Xuexuan et al., 2017). Las simulaciones numéricas mediante la aplicación del software HYDRUS permitirán evaluar la magnitud del aporte de sales al suelo y verificar la situación actual, mediante datos recabados en campo. El código, ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards modificada para el flujo no saturado, que incorpora la extracción de humedad por raíces, y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos. El objetivo de este trabajo es determinar los principales mecanismos de movilidad y acumulación de sales en un terreno limo arcilloso desde el acuífero freático somero en el sector sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Bahía Blanca se encuentra en el sector Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, aproximadamente en los 38°43' Latitud Sur y 62°16' Longitud Oeste. El área de estudio se ubica en el sector sudoeste de la localidad, en cercanías a la localidad de Ingeniero White, hacia el Oeste y al estuario de Bahía Blanca, hacia el Sur. En este sector se ubican el parque industrial y petroquímico, el puerto de Bahía Blanca, algunos asentamientos informales y vías de comunicación.

El clima de la ciudad de Bahía Blanca es templado, con valores medios de temperatura comprendidos entre 14 °C y 20 °C y estaciones térmicas bien diferenciadas (Capelli de Steffens y Campo de Ferraras, 2004). Las precipitaciones medias para el período de 1908 - 2008 en el suroeste bonaerense se estimaron en 584 mm (Campo et al., 2009). Los máximos valores de precipitación se manifiestan en primavera y en otoño y los mínimos en invierno. Carrica y Lexow (2006) estimaron valores de evapotranspiración potencial (ETP) de 1170 mm y evapotranspiración real (ETR) de 401 mm para el período 2003-2006.

Geomorfológicamente, el área comprende una plataforma de abrasión marina labrada, sobre sedimentos Plio-plistocénicos, por ingresiones marinas holocenas. Sobre la misma se depositan sedimentos de origen marino, asociados a rellenos de marea. Las áreas que denotan condiciones naturales se presentan como relictos restringidos, ya que la mayor parte del área se encuentra modificada antrópicamente. La geología fue descrita por Fidalgo (1983), quien denominó Sedimentos Pampeanos (Fidalgo et al., 1975), a limos loessicos de edad Pliocena

que subyacen a los depósitos marinos recientes de la Formación Maldonado (Fidalgo, 1983). Esta última consiste en una facies granodecreciente, con arenas oscuras en la base (con contenidos de fracción limo o limo arcilla menor al 35%) que pasan gradualmente a limos arenosos, limos arcillosos y arcillas limosas (carente o con contenidos muy pobres de arena). El relleno artificial de los suelos comprende material de relleno constituido por sedimentos pampeanos triturados y compactados artificialmente. En el área circundante a los canales de navegación se adiciona material arenoso mediano a fino originado durante las tareas de dragado del estuario. El acuífero costero libre se encuentra contenido por la Formación Maldonado conjuntamente con los Sedimentos Pampeanos, quienes forman el piso de los canales de navegación del estuario de Bahía Blanca. Aunque existen diferencias en sus características litológicas, ambas pueden ser consideradas como una única unidad hidrogeológica. El nivel freático en el área costera, catalogado como hipersalino por Bonorino y Sala (1983), mantiene profundidades someras, cercanas al metro en la mayor parte del año, formando anegaciones temporales durante los períodos húmedos de máxima expresión.

Los suelos naturales presentan texturas franco limosas a franco arcillosas, con escasa cobertura vegetal, en general de tipo halófito; son de escaso desarrollo, salinos y mal drenados. En superficie, muestran eflorescencias salinas y en profundidad grandes cantidades de carbonato de calcio y yeso, clasificándolos como Ustifluventes ácuicos y Salortides acuólicos (INTA, 1989).

METODOLOGÍA

El modelo de movilidad de sales solubles en el perfil no saturado se realizó mediante la aplicación del software HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006). El código HYDRUS ejecutable en ambiente Windows, resuelve la ecuación de Richards modificada (1) para el flujo no saturado y de advección-dispersión (2) para el transporte de solutos, en determinada sección de estudio, según condiciones iniciales y de borde establecidas por el usuario. La ecuación de Richards modificada, que añade un término sumidero para incorporar la extracción de agua por raíces, es resuelta mediante el método de elementos finitos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] - S \quad (1)$$

Donde θ representa la humedad volumétrica ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), h es la presión matricial (cm), S es el término sumidero ($\text{cm}.\text{día}^{-1}$), x_i ($i=1,2,\dots,n$) son las coordenadas espaciales, t es el tiempo (s), K_{ij}^A son las componentes del tensor de anisotropía adimensional y K es la conductividad hidráulica no saturada ($\text{cm}.\text{día}^{-1}$).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} + \frac{\delta(\theta c)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(\theta D \frac{\delta c}{\delta z} - qc \right) - S \quad (2)$$

Donde c representa la concentración en la fase líquida (mg.L^{-1}), D es el coeficiente de dispersión hidrodinámica ($\text{cm}^2.\text{día}^{-1}$), q representa el flujo no saturado ($\text{cm}^3.\text{día}^{-1}$) y

z (cm) es la dirección del flujo considerándose flujo vertical unidireccional.

El modelo fue calibrado siendo capaz de representar al final de la simulación la situación actual de campo. Durante diversas campañas se relevó la profundidad del nivel freático y se tomaron muestras de suelo y agua subterránea para su posterior análisis en laboratorio y caracterización físico-química.

Elaboración del Modelo

El período de simulación consistió en 2451 días, iniciando el 01/01/2011 y finalizando el 13/09/2017. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,01 (día), paso mínimo $1.e^{-003}$ (día) y máximo 1 (día). El modelo hidráulico elegido para la simulación fue el propuesto por Van Genuchten-Mualem (3) (Van Genuchten, 1980; Mualem, 1976).

$$Se = 1 + [(\alpha h)^n]^{-m} \quad (3)$$

Donde $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ es la humedad efectiva, $\alpha = h_a^{-1}$ es un parámetro empírico determinado por la inversa del valor de entrada de aire, h corresponde a la tensión matricial y n y m , son parámetros empíricos siendo $m=1-1/n$. La conductividad hidráulica (4) se estima mediante la ecuación:

$$K(Se) = K_s Se^l \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (4)$$

Donde K_s corresponde a la conductividad hidráulica saturada y l es la conductividad de poro para el cual se sugiere un valor de 0,5 por Mualem (1976) tras numerosos ensayos en varios suelos.

Se consideró una sección estudio rectangular de 120 cm de alto y 100 cm de ancho, la cual fue discretizada en una malla de 801 nodos y 1512 subdominios triangulares. El material considerado consistió en un limo arcilloso cuyos parámetros hidráulicos (Tabla 1) fueron estimados mediante la función de pseudotransferencia Rosseta Lite (V1.1) (Schapp et al., 2001).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos utilizados en la simulación.

Textura	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α	n	K_s ($\text{cm}.\text{día}^{-1}$)
Limo arcilloso	0,4795	0,0942	0,0113	1,4085	13,22

Las condiciones iniciales fueron introducidas en términos de presión matricial, considerando valores típicos para la fecha de inicio de simulación (Lafont, 2009; Lexow et al., 2017; Scherger, 2017). El límite superior de la sección, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por la precipitación diaria y la ETP de referencia que fue estimada por el método de Penman-Monteith modificado según la FAO N° 56 (1998) (Figura 1). Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que para el límite inferior se considera un potencial constante, $h=0$ cm, representativo de un nivel freático estático. Se introduce el término de extracción de agua por raíces bajo el modelo de Feddes et al., 1978 (en Simunek et al., 2006), considerando una cubierta herbácea de profundidad de raíces somera.

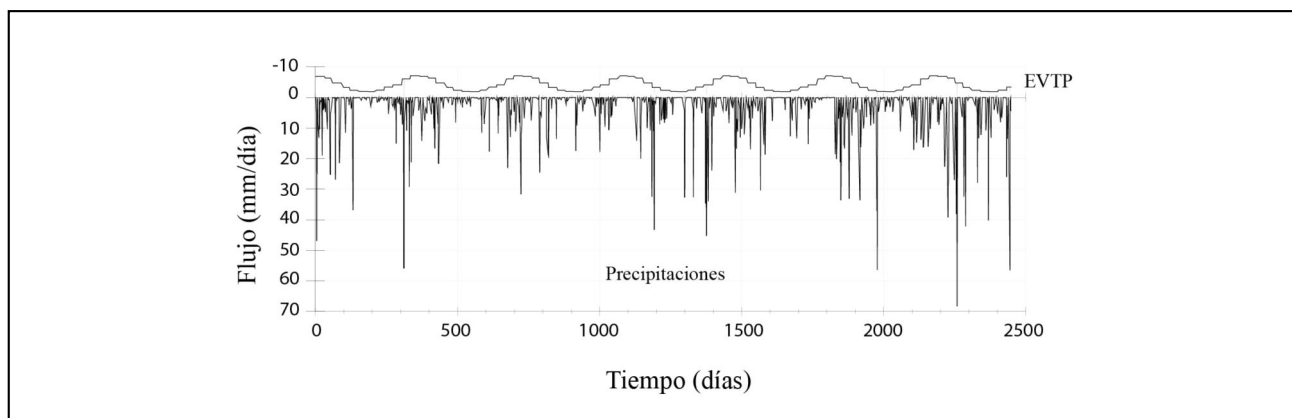


Figura 1. Flujos atmosféricos correspondientes al período 2011-2017.

$$\text{TSD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \text{CE} * 0,64 \quad (5)$$

La concentración salina del agua subterránea (TSD) (5) se calculó a partir de la relación con la conductividad eléctrica (CE) la cual se obtuvo a partir del modelo matemático de estimación lineal para todas las muestras relevadas.

La concentración de sales en el agua de lluvia se tomó como un valor constante de 64 mg.L^{-1} (Carrica, 1998). Las sales se simularon como solutos no reactivos, siendo despreciables los procesos de adsorción, disolución, intercambio catiónico, etc. La dispersividad longitudinal (α_L) fue considerada de 17 cm, siendo la dispersividad transversal (α_T) un 10% de la anterior y la difusividad en fase líquida de $5 \text{ cm}^2\text{día}^{-1}$, similarmente a los expuestos en la bibliografía existente (Forkutsa et al., 2009; Phogat et al., 2013; Phogat et al., 2014 y Yurtseven et al., 2014, entre otros).

Calibración del modelo

Para la comprobación de la metodología se comparan las simulaciones obtenidas con datos registrados en campo. La validación se realizó mediante el estimador estadístico del cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (6).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim}} - Q_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Donde Q_{sim} corresponde al valor de concentración salina obtenida en la simulación y Q_i es el valor medido en campo, siendo n la cantidad de muestras relevadas.

RESULTADOS

Comportamiento Hidrodinámico

Las simulaciones obtenidas (Figura 2) reflejan la dinámica del sistema no saturado, donde las características del terreno limo arcilloso natural y las condiciones atmosféricas e hidrológicas del entorno son los factores que controlan los flujos hídricos verticales dentro de la ZNS.

El perfil de suelo refleja humedades volumétricas relativamente altas durante todo el transcurso del período simulado. Los niveles superficiales, representados por los nodos de 15 cm

y 30 cm, indican los contenidos máximos y mínimos de humedad, vinculados a la existencia de períodos climáticos húmedos o secos respectivamente. Las precipitaciones de gran cuantía generan condiciones de saturación parcial en la superficie del terreno, donde la infiltración, encargada de redistribuir el bulbo húmedo a lo largo del perfil, es limitada por los bajos valores de permeabilidad vertical del terreno. Durante los meses de invierno, caracterizados por valores bajos de EVTP, suelen generarse encharcamientos en campo, que pueden extenderse varios días luego de transcurrida la lluvia.

A medida que incrementa la profundidad decrece la influencia de las condiciones atmosféricas superficiales sobre la hidrodinámica del medio, siendo las variaciones de humedad más restringidas. En esta zona, la acción de la evapotranspiración disminuye notablemente, dado que las raíces no se extienden más de 25 cm de profundidad en campo, siendo el proceso de capilaridad el fenómeno que permite la existencia de flujos verticales ascendentes. Los nodos de 60 cm y 90 cm mantienen contenidos volumétricos entre 42 a $44 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ y entre 45 a $48 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ respectivamente. Estos nodos son influenciados directamente por la presencia del nivel freático somero, el cual se ubica a 120 cm de profundidad durante el período simulado. Con el modelo propuesto se determinó un espesor para la franja capilar (FC) de hasta 95 cm, similarmente a los valores expuestos por otros autores, la cual se moviliza masivamente con las fluctuaciones del nivel freático (Pérez Marfil et al., 2017; Lexow et al., 2017).

Las tensiones matriciales simuladas durante el período son características de materiales finos, donde los gradientes de potencial en el perfil no saturado son consistentes con bajas velocidades de transferencia de humedad. Para que existan grandes cambios en el contenido volumétrico son necesarios grandes variaciones de tensión matricial, hecho que se refleja en las bajas pendientes de la curva de retención de humedad para estos materiales. Los nodos más superficiales, ubicados en la zona de evapotranspiración muestran los valores de succión más negativos, de hasta -150 cm, reduciéndose hasta valores de 0 cm durante la saturación del terreno. En el sector de la FC las tensiones se mantienen con valores menores que la presión de entrada de aire (h_a), considerada en 88,4 cm para el material limo arcilloso. Aquí la posición del nivel freático determina una influencia directa sobre la tensión matricial y el contenido de humedad del terreno, siendo ambos los reguladores del flujo hídrico vertical en el sector no saturado.

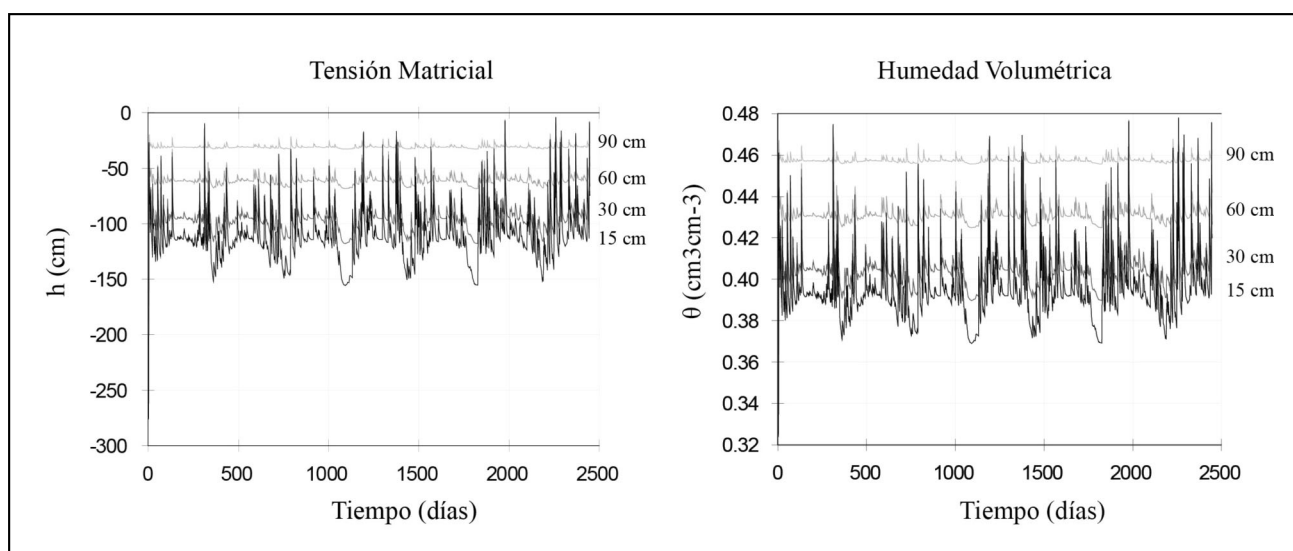


Figura 2. Simulación de la tensión matricial y humedad volumétrica para el período 2011-2017.

Evaluación del flujo no saturado

La dirección del flujo hídrico en la ZNS, considerando únicamente el sentido vertical, queda determinado por las variaciones del potencial hidrodinámico total (PHT), donde la humedad se desplaza desde las zonas de mayor a menor potencial. De este modo, la ZNS puede ser subdividida en sectores donde el agua puede moverse en forma ascendente, con dominio de potenciales mátricos y contribuir a la evapotranspiración o descendente, con dominio de potencial gravimétrico, como recarga en tránsito. Las simulaciones del PHT poseen un registro muy diverso durante el período 2011 - 2017, aunque pueden agruparse en cuatro escenarios, caracterizadas por diferentes situaciones de flujo, siendo los mismos netamente ascendente, netamente descendente, ascendente en la porción superior y descendente en la porción inferior o viceversa (Figura 3). En estos dos últimos casos, se destaca la existencia de un plano de flujo cero (PFC), donde la humedad diverge o converge respectivamente.

La existencia de flujo netamente ascendente en el perfil no saturado es asociada a períodos climáticos secos y cálidos, caracterizados por altos valores de ETP. La cercanía del nivel freático a la superficie, permite el ascenso directo de humedad a los niveles superficiales del suelo, fenómeno promovido a su vez por las características texturales del terreno. Bajo estas condiciones, las sales solubles podrán ser movilizadas desde el acuífero hipersalino conjuntamente con el agua capilar, acumulándose en los niveles superficiales del suelo a medida que la humedad es transferida a la atmósfera.

El ingreso de agua al perfil, ocasionado por las precipitaciones, genera un aumento de la humedad en los poros del terreno disminuyendo la tensión capilar. Cuando las fuerzas gravitatorias superan la componente matricial del PHT, se generan flujos verticales descendentes en los niveles superiores de la ZNS, conformándose un PFC convergente. Si las precipitaciones son de gran cuantía, se logran establecer condiciones de flujo netamente descendente donde la humedad infiltra, percola y posteriormente recarga al acuífero hasta que el descenso de humedad en la porción superior, ya sea por transferencia hacia los sectores profundos o debido al desecamiento por

evapotranspiración, permite nuevamente el aumento en la succión del terreno y el predominio de flujos ascendentes en la porción superior. Bajo estas condiciones se genera un PFC divergente, cuya profundidad podrá variar hasta que se retorne a alguno de los escenarios previos.

Aunque en la Figura 3, se esquematiza el modelo simplificado de flujo en la ZNS cabe destacar que el pasaje de un escenario a otro es sumamente dinámico, siendo en la realidad muy variables las condiciones de flujo no saturado, regulado principalmente por las condiciones meteorológicas e hidrogeológicas del subsuelo (heterogeneidad textural, estructura, propiedades físico-químicas y biológicas).

Evaluación de la movilidad de sales solubles

Las sales solubles en la ZNS fueron simuladas como solutos no reactivos, considerándose a los procesos de advección y dispersión hidrodinámica los encargados del transporte. El acuífero freático comprende la fuente de salinidad, las cuales ascienden a los niveles superiores del suelo por los procesos explicados anteriormente. El tenor salino del agua subterránea fue determinado en 6400 mg.L^{-1} aproximadamente, equivalente a conductividades eléctricas cercanas a $10.000 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$, medidas en laboratorio.

Los resultados alcanzados en la simulación permiten presentar la situación actual de campo (Figura 4), siendo el ajuste logrado aceptable en los niveles profundos del suelo con un valor de RMSE (raíz del error cuadrático medio) de $0,22 \text{ g.L}^{-1}$, simulándose en forma aceptable la transferencia de sales al sistema no saturado por ascenso capilar desde el acuífero hipersalino.

Las concentraciones salinas en el suelo, se encuentra ligadas directamente a los flujos hídricos no saturados. Los nodos de 15 cm y 30 cm reflejan la movilidad de sales solubles en los niveles superficiales del suelo (Figura 5). Durante períodos de escasas precipitaciones y gran demanda de humedad por parte de la atmósfera, priman los movimientos de humedad verticales ascendentes generando la acumulación de sales en los niveles superficiales del suelo por evapotranspiración. En estos

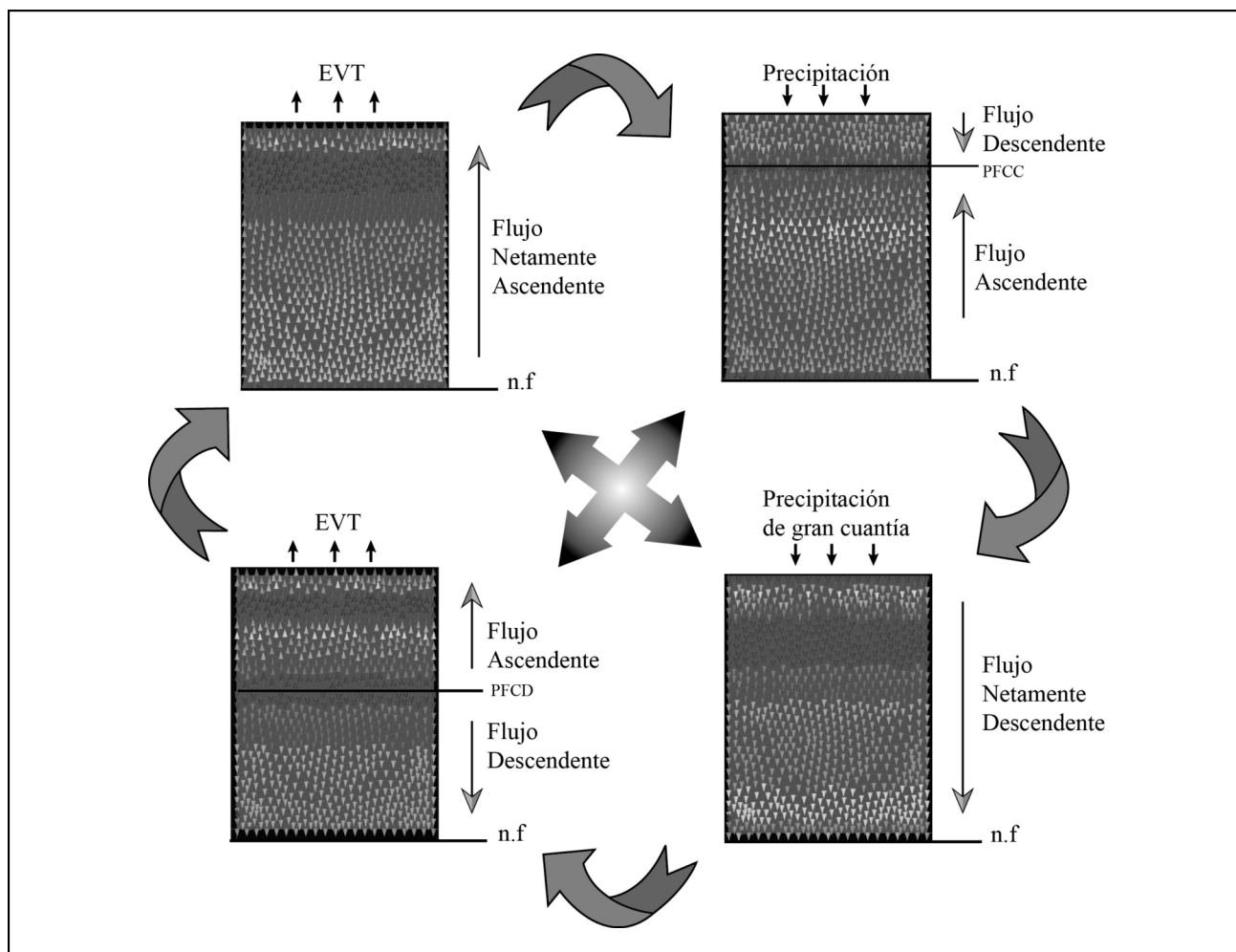


Figura 3. Modelo esquemático del flujo de humedad unidireccional vertical en la ZNS.

períodos las concentraciones salinas presentan picos de hasta 18000 mg.L^{-1} , siendo muy superiores a las concentraciones halladas en el acuífero freático. Estos episodios representan un potencial peligro para las estructuras y construcciones de hormigón, dada la alteración de las sales solubles sobre los agregados pétreos (Pérez Marfil *et al.*, 2017). Los efectos pueden verse magnificados especialmente durante períodos de stress hídrico, como los ocurridos en los meses de verano del año 2013 y 2015.

Las precipitaciones aportan agua de baja salinidad al suelo, promoviendo los procesos de lavado y dilución. Este efecto es observable en años húmedos como el 2011, 2014, 2016 y 2017, donde las precipitaciones superaron los 500 mm anuales. Durante los meses lluviosos el lavado remueve las sales de los niveles superficiales y transporta los solutos hacia la base del perfil, encontrándose concentraciones de entre 2000 mg.L^{-1} a 5000 mg.L^{-1} .

En sectores profundos de la sección, la posición del nivel freático ejerce influencia sobre las concentraciones salinas del mismo modo que lo hace sobre la hidrodinámica. Las concentraciones en la FC varían entre 3500 mg.L^{-1} a 8000 mg.L^{-1} , según la época del año, consistentes en períodos climáticos húmedos o secos, encontrándose en pseudoequilibrio con la salinidad del agua subterránea (Figura 5).

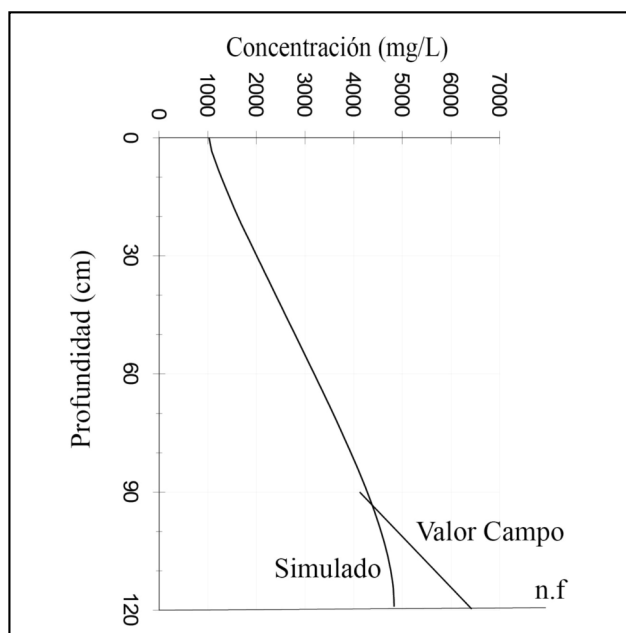


Figura 4. Valores de concentración simulados y medidos en campo para $t=2451$.

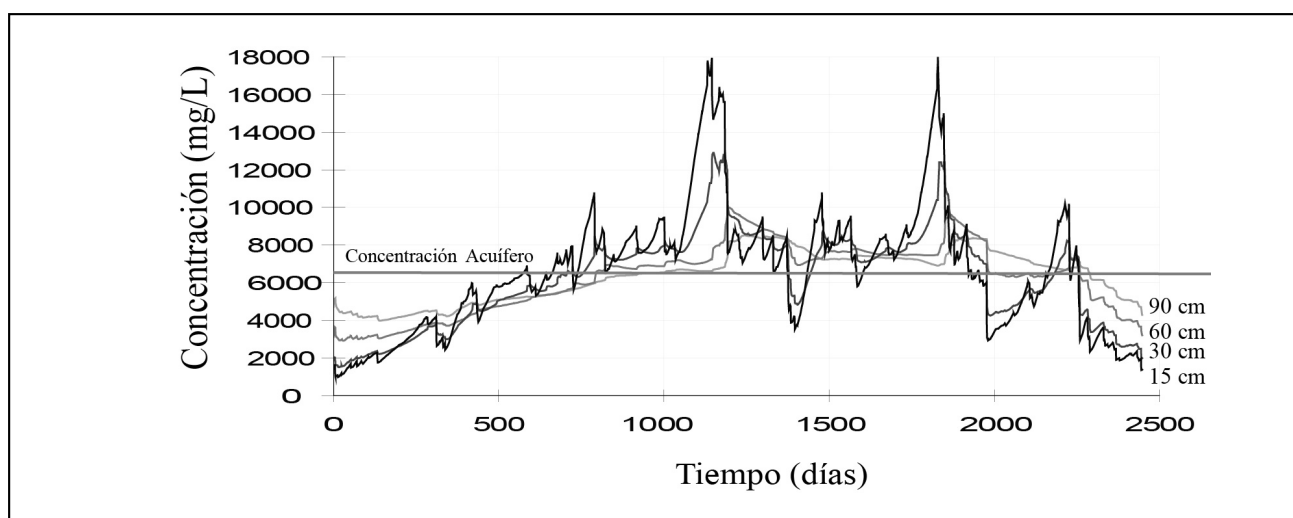


Figura 5. Simulación de las concentraciones salinas para el período 2011-2017.

De acuerdo a los resultados obtenidos se comprueba que ciertas problemáticas relacionadas al deterioro de pavimento y estructuras de hormigón en el sector Sudoeste de la ciudad de Bahía Blanca podrían relacionarse a la presencia de sales solubles en los niveles superficiales del suelo. Las simulaciones realizadas permiten establecer un escenario factible para el transporte de solutos en el medio no saturado, donde la presencia de un acuífero freático somero hipersalino sumado a la textura fina del suelo permite el ascenso de sales solubles debido a los fenómenos de capilaridad y evapotranspiración. En el futuro será necesario profundizar las simulaciones incorporando los procesos de precipitación, intercambio catiónico, dilución, etc., como las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.

CONCLUSIONES

Los suelos del sector sudoeste de la Ciudad de Bahía Blanca presentan problemas de salinidad asociados a la transferencia de solutos desde el acuífero hipersalino. El ascenso capilar es puesto en marcha por el proceso de evapotranspiración y

favorecido por la textura fina de los sedimentos que componen la ZNS.

Las simulaciones con el código HYDRUS 2D/3D permiten evidenciar la dinámica salina, lográndose distinguir la influencia de la franja capilar y de las condiciones atmosféricas sobre las concentraciones de sales en el perfil de suelo. Los períodos cálidos y secos comprenden el escenario de mayor peligro para las estructuras de superficie, donde la acumulación de sales puede llegar hasta concentraciones de 18000 mg.L⁻¹.

Las precipitaciones permiten el ingreso de agua de baja salinidad al perfil de suelo, ocasionando los procesos de lavado y dilución.

Las concentraciones en la franja capilar se encuentran en pseudoequilibrio a las halladas en el acuífero freático. Será necesario profundizar el muestreo de campo para lograr un mejor ajuste del modelo de transporte, como así también incorporar en la simulación las reacciones en la interfaz suelo-agua-hormigón.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AJDARY, K., 2008.
Application of Hydrus-2D for Simulation of Water Distribution in Different Types of Soils.
International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey, 2008. Pp: 253-261.
- ARBAT, G., BARRAGÁN, J., PUIG, J., POCH, R. Y RAMÍREZ DE CARTAGENA, F., 2003.
Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo hydrus-2d y Simdas en riego localizado.
Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (eds.), 2003.
- ASKRI, B., ABDELKADER T., TAREK, A., RACHIDA, B., 2014.
Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use.
Journal of Hydrology. Vol. 513 (2014): 81-90.
- BONORINO, A. G. Y SALA, J. M., 1983.
Capítulo: Geohidrología. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la Provincia de Buenos Aires.
Informe Final. La Plata. Inédito.
- CAMPO, A., RAMOS, B. Y ZAPPERI, P., 2009.
Análisis de las variaciones anuales de precipitación en el suroeste bonaerense, Argentina.
XII Encuentro de Geógrafos de América Latina. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 12 pp.
[Actas electrónicas: http://legal2009.easyplanners.info/area07/7085_Campo_Alicia_M_.pdf].

- CAPELLI DE STEFFENS, A. M. Y CAMPO DE FERRERAS, A. M., 2004.
Climatología.
En: Ecosistema del estuario de Bahía Blanca. Piccolo, M. C. y M. S. Hoffmeyer (eds.). Instituto Argentino de Oceanografía, Bahía Blanca, Argentina. Pp 79-88.
- CARRICA, J., 1998.
Hidrogeología de la Cuenca del Arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires.
Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Biblioteca Central, 215pp y anexos. Inédito.
- CARRICA, J.C. Y LEXOW, C., 2006.
Subsistencia en el área costera de Bahía Blanca, Argentina.
VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asunción, Paraguay. En CD.
- CORWIN D L, RHOADES, J.D. Y SIMUNEK, J., 2007.
Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models.
Agricultural Water Management Vol. 90: 165-180.
- FAO, 1998.
Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage: paper 56.
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- FEDDES, R. A., KOWALIK P. J., AND ZARADNY, H., 1978.
Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons,
New York, NY, 1978.
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, J. Y PASCUAL, R., 1975.
Geología superficial de la llanura bonaerense.
VI Congreso Geológico Argentino (Bahía Blanca). Relatorio, 104 - 128, Buenos Aires.
- FIDALGO, F., 1983.
Geología y Geomorfología del área de White-Cerri y los alrededores de bahía blanca.
Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la provincia de buenos Aires. Inédito.
- FORKUTSA, I., SOMMER, R, SHIROKOVA, I, LAMERS, J.P.A., KIENZLER, K. TISCHBEIN, B., MARTIUS, C.
Y VLEK, P.L.G., 2009.
Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II.
Soil salinity dynamics. Irrigation Science (2009) Vol. 27:319-330.
- GARDENAS, A.I., HOPMANS, J.W., HANSON, B.R. Y SIMUNEK, J., 2005.
Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation.
Agricultural Water Management. Vol. 74 (2005): 219-242.
- GRAHAM, T., 2005.
On the road to better management: An investigation into the benefits of managing the impacts of dryland salinity on roads.
Proceeding of the 49th Conference of Australian Agricultural and Resource Economics Society.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA, 1989.
Mapas de suelos de la Provincia de Buenos Aires.
Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 527 p., Buenos Aires.
- IRASSAR, E.F., DI MAIO, A. Y BATIC, O.R., 2010.
Deterioro de hormigón por cristalización de sales.
VI Congreso Internacional sobre patología y recuperación de estructuras. Córdoba, Argentina. Actas de Congreso.
- LAFONT, D., 2009.
Identificación y caracterización de contaminantes metálicos en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca.
Tesis Doctoral. UNS. Bahía Blanca. 137p y anexos. Inédito.
- LEXOW, C., 2010.
Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado.
I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina. 21 al 24 de Septiembre del 2010. Actas de Congreso.
- LEXOW, C., 2011.
Flujo transitorio en suelos limo arenosos: aplicación del código Hydrus 2D /3D.
VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Sesión Técnica: Captación y Modelación de Agua Subterránea. Salta, Argentina, 2011. Actas de congreso. ISBN: 978-987-23936-8-7.

- LEXOW, C., PERA VALLEJOS, G. Y BAUER, E., 2017.
Comportamiento de la franja capilar en el sector oeste de la Ciudad de Bahía Blanca.
XX Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán. Sección Técnica 15, pág.: 65-66.
- MUALEM, Y., 1976.
A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.
Water Resources Research. Vol. 12(3):513-522.
- OSHIRO, A., BARONETTO, C., BELTRAMONE, C. Y POSITIERI, M., 2008.
Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química.
Exacta, Vol. 6 (1): 93-108. ISSN 1678-5428.
- PEREZ MARFIL, P., BAUER, E., LESCOANO, L., PERA VALLEJOS, G., PRIANO, C., BEREZOSKY, J.J., LEXOW, C. Y MARFIL, S., 2017.
Causas del deterioro prematuro de pavimentos de hormigón de la Ciudad de Bahía Blanca y rutas de acceso, su relación con la franja capilar.
IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Provincia de Buenos Aires, Ciudad de Quilmes. E-book, Actas: 12 pp.
- PHOGAT, V., SKEWES, M.A., MAHADEVAN, M. Y COX, J.W., 2013.
Modelling water and salinity distribution in soil under advance fertigation systems in horticultural crops.
20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013.
- PHOGAT, V., SKEWES, M.A., COX, J.W., SANDERSON, G., ADAM J. Y SIMUNEK, J., 2014.
Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching.
Journal of Hydrology. Vol. 513, (2014): 504-516.
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F.J. AND VAN GENUCHTEN, M. TH., 2001.
Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions.
Journal of Hydrology, Vol. 251, (2001):163-176.
- SCHERGER, L. 2017.
Aplicación del código Hydrus 2D/3D para el estudio de la hidrodinámica de la ZNS, en el ámbito industrial de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina.
IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Provincia de Buenos Aires, Ciudad de Quilmes. E-book, Actas: 12 pp.
- SIMUNEK, J., SEJNA M., AND VAN GENUCHTEN M. TH., 2006.
The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media.
Version 1.0.PC Progress, Prague, Czech Republic.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980.
A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.
Soil Science Society of American Journal, Vol. 44(3):892-898.
- XUEXUAN, X., SHAHMIR, A., WENYUAN, C. Y SAJJAD, R., 2017.
The evaluation/application of Hydrus-2D model for simulating macro-pores flow in loess soil.
International Soil and Water Conservation Research. Vol. 5(2017): 196-201.
- YURTSEVEN, E., OZTURK, H.S. Y AVCI, S., 2014.
Mass Balance Criteria in Soil Salinity Management: Different Irrigation Water Qualities and Leaching Ratio.
Journal of Agricultural Sciences Vol.20 (2014) 103-111.